EFECTO DE LA COMPONENTE SISMICA VERTICAL SOBRE LAS NAVES DE LA CATEDRAL DE MORELIA

Guillermo Martínez Ruiz[1], Rafael Rojas Rojas[1], Rodolfo Gaytan Rodríguez[2]

RESUMEN

El presente trabajo se centra en la obtención del comportamiento sísmico para las naves de la Catedral de Morelia en México, involucrando tanto la componente horizontal del movimiento como el efecto de la componente vertical, de cara a establecer un primer referente de la influencia de esta última en el desempeño de estructuras de mampostería antigua conformadas por tres naves longitudinales, típicas del estilo Barroco-Renacentista común en México y Latinoamérica.

ABSTRACT

This research focuses on obtaining the seismic behavior for the naves of the Morelia Cathedral in Mexico, involving both the horizontal component of the shaking as the effect of the vertical component, in order to establish a first reference to the influence of the latter component to the performance of ancient masonry structures formed by three longitudinal naves, typical of the Baroque-Renaissance style common in Mexico and Latin America.

INTRODUCCIÓN

La catedral de Morelia (ver figura 1) tuvo un periodo constructivo de 84 años (1660-1744) el cual inició el alarife Vicencio Barroso Escayola, que estuvo al frente de la misma de 1660 hasta su muerte en 1688; lo sucedió el arquitecto español Antonio de Echevira, y éste, hacia 1695, fue sustituido por Juan de Silva. A Silva lo sucedió en 1709 Lucas Durán, padre del famoso alarife vallisoletano don Diego Durán, quien la concluyó en 1744.

Figura 1 Vista principal de la catedral de Morelia

[1] Profesor Investigador, Edificio de Posgrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Av. Francisco J. Mújica S/N, Morelia, Michoacán, México, Teléfono: (443)3041002; Fax: (443)3041002; gmruiz@umich.mx, rrojas@umich.mx.

[2] Egresado de la Maestría en Estructuras, Edificio de Posgrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Av. Francisco J. Mújica S/N, Morelia, Michoacán, México, Teléfono: (443)3041002; Fax: (443)3041002; gaytan444@hotmail.com.

La estructura está conformada por tres naves longitudinales con capillas en las últimas dos crujías así como de ocho naves transversales incluyendo el transepto. Las naves laterales tiene bóvedas de crucería con una altura al intradós de 15.35m a diferencia de la nave central que es de cañón con lunetos entre arcos fajones y altura al intradós de 20.60m (ver figura 2). En lugar de pilares con medias columnas, como ocurre en casi todas las catedrales mexicanas, se emplean pilares con pilastras o medias muestras. Cuenta con dos torres de 62m de altura, siendo estas las cuartas más altas de México y las de mayor altura en zona de alta sismicidad construidas en su totalidad con cantera. El cimborrio tiene una altura total de 40.30m y un peso de 176 toneladas.

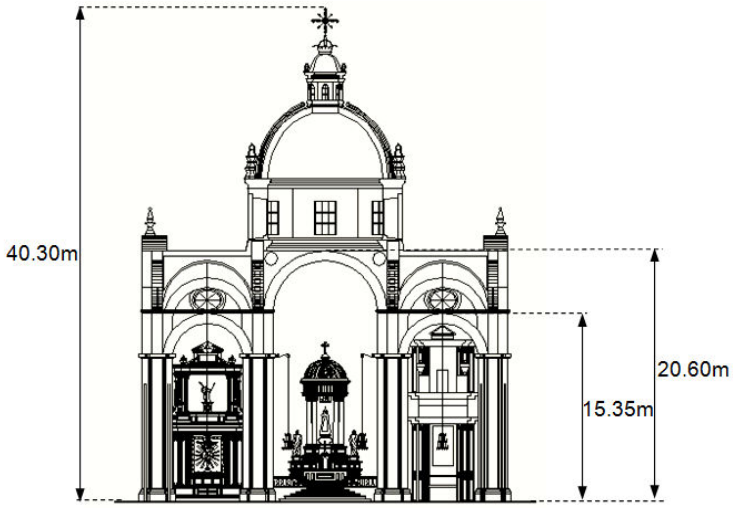

Figura 2 Sección transversal

ANTECEDENTES

En trabajos previos se estudió la fragilidad sísmica para las torres y portadas de la catedral de Morelia (Gaytan *et al*., 2010) utilizando modelos tridimensionales de elementos finitos. En este caso se hizo evidente la necesidad de evaluar la vulnerabilidad de las naves, ya que al analizarse parcialmente un macroelemento transversal tipo dentro del sistema estructural global, se obtuvieron grados de daño de moderados a extensivos, a diferencia de las torres que presentaron daños ligeros ante periodos de retorno de 475 y 975 años. Según análisis temporales paso a paso los daños se concentraron mayormente sobre las naves laterales, situación que se consideró en su momento que podría comprometer la seguridad de los ocupantes y el edificio ante futuros terremotos.

Derivado de lo anterior, se estudió la fragilidad sísmica de las naves en su dirección corta (Martínez *et al*., 2011) empleando modelos de Elementos Rígidos (Peña, 2010) sobre modelos bidimensionales de los macroelementos que conforman los pórticos transversal o tipo y los de la zona del transepto; encontrándose que los macroelementos pórtico transversal son los más vulnerables esperándose a futuro daños de moderados a extensivos (lo cual corrobora el estudio de Gaytan *et al*., 2010), a diferencia de los dos pórticos de la zona del transepto, que aún cuando soportan una carga mayor debido al peso del cimborrio, solo han de esperarse para los mismos daños de ligeros a moderados.

Como resumen, con la idealización y los criterios considerados en la última etapa mencionada, las naves de la catedral de Morelia presentan un aceptable desempeño ante las demandas sísmicas de 475 y 975 años, sin embargo se planteó la necesidad de conocer el comportamiento de dichas naves considerando ahora la componente vertical del movimiento sísmico actuando simultáneamente a la horizontal.

DEMANDA SÍSMICA

Para el análisis se utilizaron cinco registros sísmicos reales escalados a la aceleración máxima del terreno esperada en el sitio (figura 3); dicho valor máximo se obtuvo a partir de un estudio probabilista de peligro

sísmico realizado en el sitio por José Manuel Jara (comunicación personal), el cual es igual a 1.60 y 1.95 m/s^2 para las recurrencias mostradas de 475 y 975 años respectivamente.

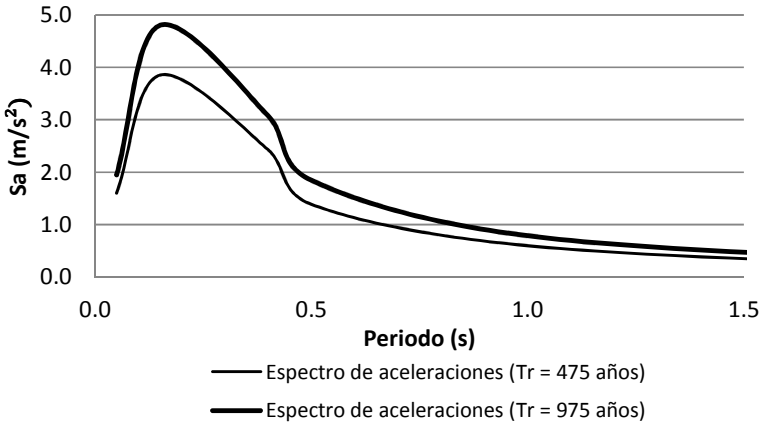

Figura 3 Espectros de demanda para el sitio

Los registros sísmicos se seleccionaron de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, tomando como criterio que la componente de aceleración vertical tuviera una variación de ± 15%, o bien fuera un terremoto que haya producido daños en estructuras de tipo patrimonial. En la tabla 1 se muestran las características principales de los sismos considerados.

Tabla 1 Demanda sísmica considerada

Fecha del sismo	Mb	Ms	Mc	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Estación
Acapulco 02/09/1996	-	-	-	-	-	-	Miconsa Acapuco Gro
Acapulco 10/12/1994	-	-	6.30	18.02 N	101.56 W	20	Miconsa Acapuco Gro.
Acapulco 31/03/1993	5.30	5.00	5.30	17.180 N	101.02 W	< 5	Miconsa Acapuco Gro.
Manzanillo 09/10/1995	5.10	4.60	4.90	18.62 N	104.56 W	9	Termoeléctrica Manzanillo
Puebla 15/06/1999	6.40	6.50	-	18.18 N	97.51 W	69	Cerro Lomatel, Cd. Serdán

Los espectros escalados para las aceleraciones probabilistas máximas del terreno considerando recurrencias de 475 y 975 años horizontal (H) y vertical (V) se muestran en las figuras 4 y 5. Se hace notar que en el caso del sismo del 15 de junio de 1999 en Puebla, la aceleración máxima del terreno para esta estación fue de 1.712 m/s^2, la cual excede en un 7% a la aceleración máxima esperada para la catedral de Morelia considerando una recurrencia de 475 años. En todos los demás casos se escaló la mayor de las componentes del movimiento y solo para el sismo de Manzanillo de 1995 la componente vertical es un 7.26% mayor que la máxima horizontal.

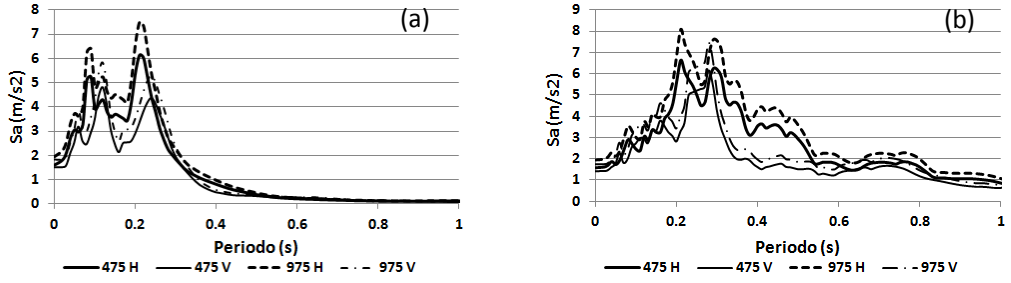

Figura 4 Espectros escalados para el sitio. Sismos del 12 de septiembre de 1996 (a) y del 10 de diciembre de 1994 (b)

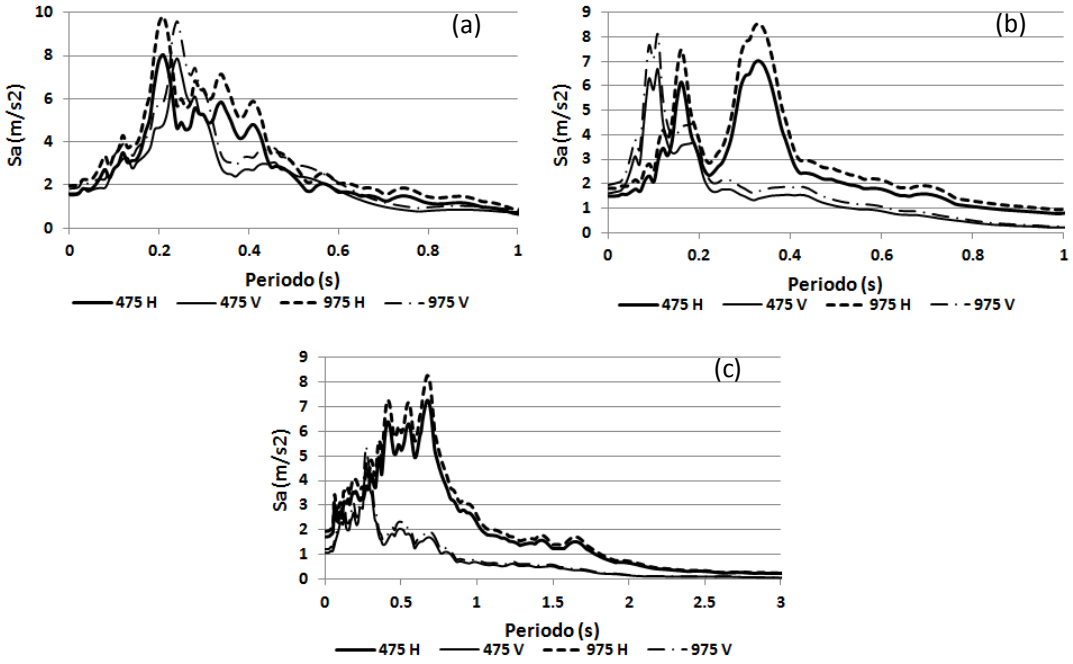

Figura 5 Espectros escalados para el sitio. Sismos del 31 de marzo de 1993 (a), del 9 de octubre de 1995 (b) y del 15 de junio de 1999 (c)

MODELADO ESTRUCTURAL

Las estructuras históricas se pueden subdividir en elementos con una respuesta sísmica que es autónoma del resto de la estructura (Doglioni *et al*., 1994), por lo que el comportamiento de este tipo de edificaciones se puede evaluar por Macroelementos. Para la presente investigación se generaron macroelementos bidimensionales que se analizaron empleando Elementos Rígidos (Casolo y Peña, 2007, Peña, 2010), los cuales son una simplificación para el análisis lineal y no lineal de estructuras de mampostería. Los elementos empleados tienes una dinámica de cuerpo rígido y forma cuadrilátera con dos desplazamientos lineales y uno rotacional. La unión entre elementos rígidos se realiza por medio de resortes inelásticos en tres puntos de conexión, de los cuales dos son axiales separados entre sí para tomar en cuenta un par de fuerzas, y el tercero es de cortante y está ubicado a la mitad del lado de conexión; estos puntos por tanto, representan los esfuerzos y deformaciones medias al interior de cada uno de los elementos rígidos.

Los macroelementos considerados se muestran en la figura 6, y comprenden tanto la dirección tranversal del edificio como la longitudinal. Se conforman entonces cuatro pórticos tipo y dos pórticos de la zona del transepto, así como dos pórticos en la dirección longitudinal. Por su alta rigidez, no se analizó el macroelemento correspondiente al muro testero. En su periferia, las naves interaccionan al oriente con la capilla del sagrario, el bautisterio, la colecturía y la sala de canónigos, mientras que al poniente con la antigua capilla de Porta Coeli, la sala capitular, la bodega, y las sacristía que está ligada con el edificio de la Mitra; zonas que tienen una altura menor a las naves y en la presente etapa de la investigación fueron despreciadas en el análisis (ver figura 6).

El macroelemento correspondiente a los pórticos tipo está formado por 142 elementos rígidos y 210 nodos, los pórticos del transepto que tienen 168 elementos y 234 nodos y los macroelementos de los pórticos longitudinales tienen 288 nodos y 187 elementos (ver figura 7). En los modelos de la dirección transversal del edificio, se supuso la existencia de muros enjutados en las zonas de rellenos sobre las bóvedas, situación que se estudiará en investigaciones posteriores aplicando técnicas de prospección geofísica, ya que se no existir tales muros, el comportamiento de los sistemas puede verse afectado de manera importante.

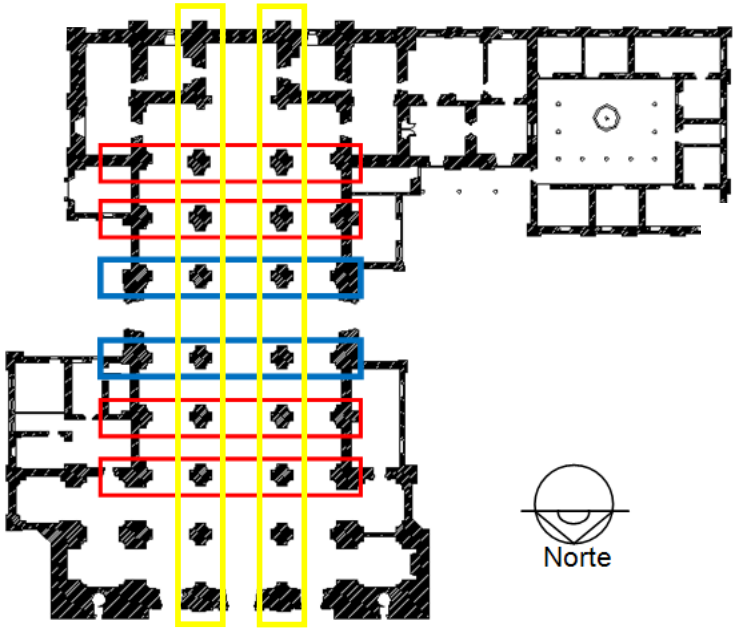

Figura 6 Planta general y posición de mecroelementos pórtico tipo (rojo), pórtico transepto (azul) y pórtico longitudinal amarillo.

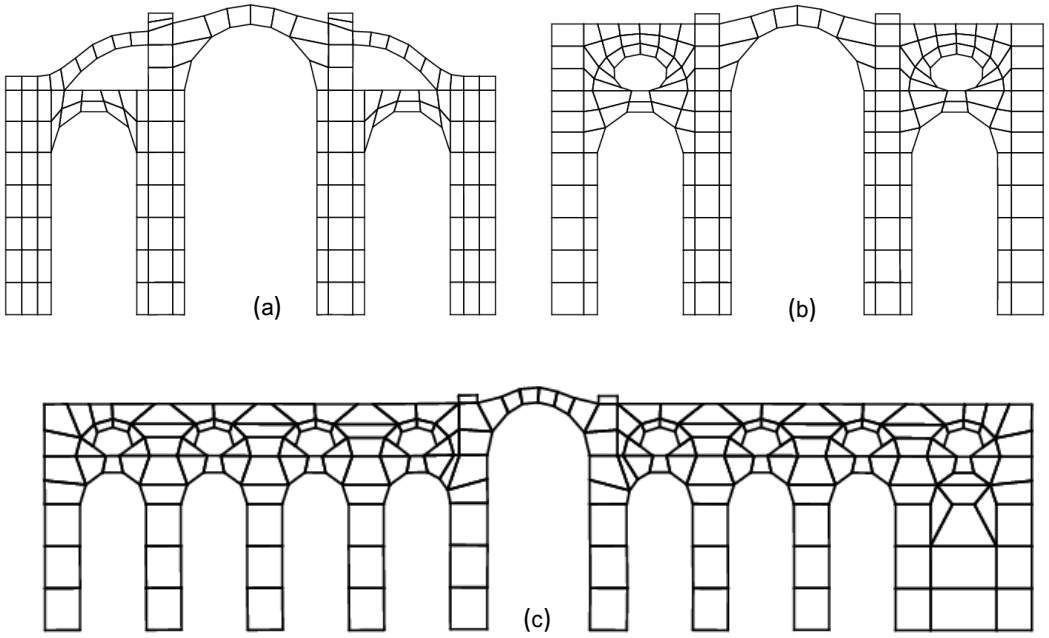

Figura 7 Macroelementos pórtico transversal (a), pórtico transepto (b) y pórtico longitudinal (c)

CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Para la actualización de los modelos numéricos se consideró como propiedad mecánica variable al módulo de elasticidad. Partiendo de la conocida ecuación 1 que relaciona la frecuencia natural de la estructura con su rigidez y su masa, se observa que la raíz de dicha frecuencia es directamente proporcional a la rigidez, por lo que si se varía esta última una cierta cantidad, la frecuencia variará proporcionalmente al cuadrado de esta cantidad.

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

La calibración anterior derivó en un proceso iterativo que al ser aplicado de manera directa sobre los diferentes macroelementos para igualar la frecuencia fundamental experimental y numérica, proporcionó un valor de módulo de elasticidad físicamente imposible para mampostería antigua, por lo que se recurrió el proceso de actualización realizado anteriormente sobre el macroelemento torres-fachada (Martínez *et al*., 2009), en el cual se midieron y procesaron vibraciones ambientales para fines de calibración, y en el cual empleando la ecuación 1 se obtuvo un valor igual a 1440.6MPa (14690kg/cm2) para dicho módulo el cual resulta razonable, ya que comúnmente puede oscilar entre los 500 y 2000MPa. Lo anterior evidencia la necesidad en estructuras patrimoniales de realizar el proceso de calibración sobre modelos globales o que conformen una sección tridimensional importante del edificio, y no sobre los macroelementos idealizados de manera individual (Martínez *et al*., 2011). Los parámetros empleados en el análisis se resumen en la tabla 2.

Tabla 2 Propiedades mecánicas calibradas (Martínez et al., 2011)

Material	Módulo de Elasticidad (MPa)	Módulo de Poisson	Densidad (Kg/m3)
Cantera en pilares y bóvedas	1440.6	0.2	2200

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

ANALISIS NO LINEAL TEMPORAL

Empleando el programa RIGID v0.4.1 (Peña, 2010) se realizaron para los tres macroelementos, los cinco registros sísmicos y las dos recurrencias, análisis no lineales en el tiempo, primeramente considerando solo la componente horizontal del movimiento para finalmente hacer actuar en un segundo análisis la acción vertical. A continuación se presentan solo algunas configuraciones relevantes de desplazamiento en la falla, así como los daños por tensión y cortante para los diferentes macroelementos.

Macroelementos Pórtico Tipo

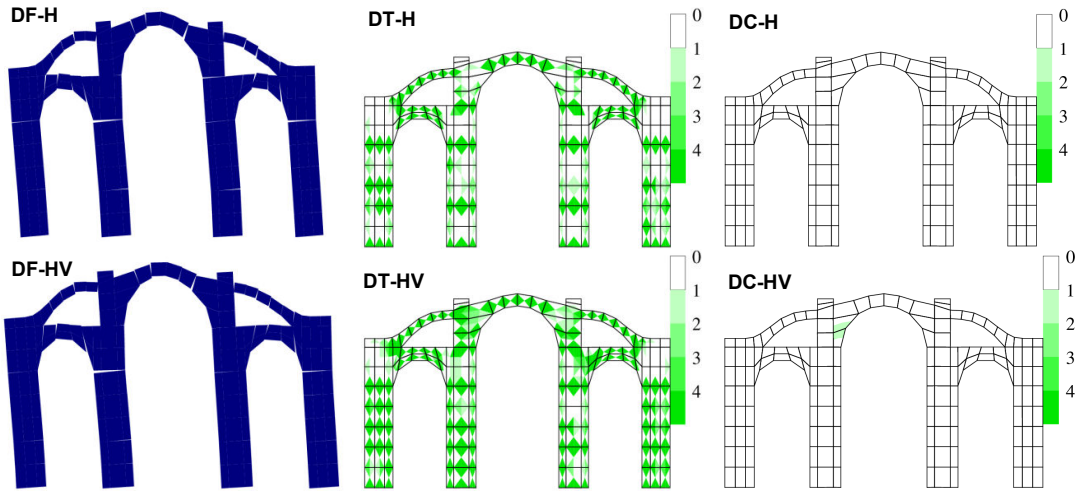

Figura 8 Terremoto de Tehuacán del 15 de junio de 1999 escalado a 475 años

En la figura 8 se muestra a la izquierda la configuración deformada de daño al final del evento sísmico (DF), al centro los daños por tensión (DT) y a la derecha los producidos por cortante (DC); en la misma

figura los gráficos de la parte superior corresponden a la componente horizontal exclusivamente, y los inferiores a la horizontal actuando simultáneamente con la vertical, condiciones que se indican en todas las figuras mediante las H y HV colocadas posteriormente al tipo de daño. En este caso que corresponde al terremoto de Tehuacán, Puebla (475 años), no se presentó daño por compresión y se observa un extensivo daño por tensión, el cual se magnifica principalmente sobre las naves laterales al actuar simultáneamente la componente vertical, la cual también produce algunos daños ligeros (grado 1) por cortante en el riñón izquierdo del arco de la nave central.

Macroelementos Pórtico Transepto

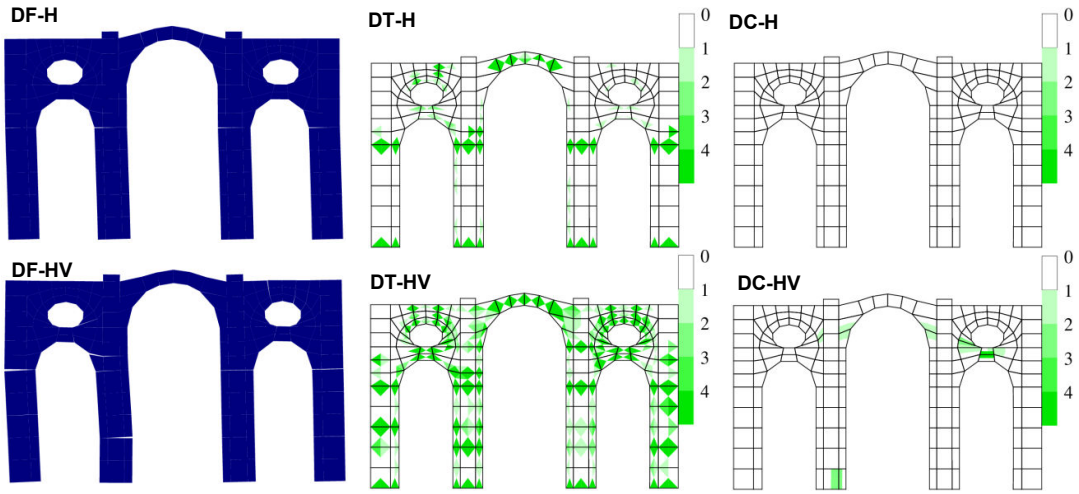

Figura 9 Sismo de Acapulco del 31 de marzo de 1993 escalado a 975 años

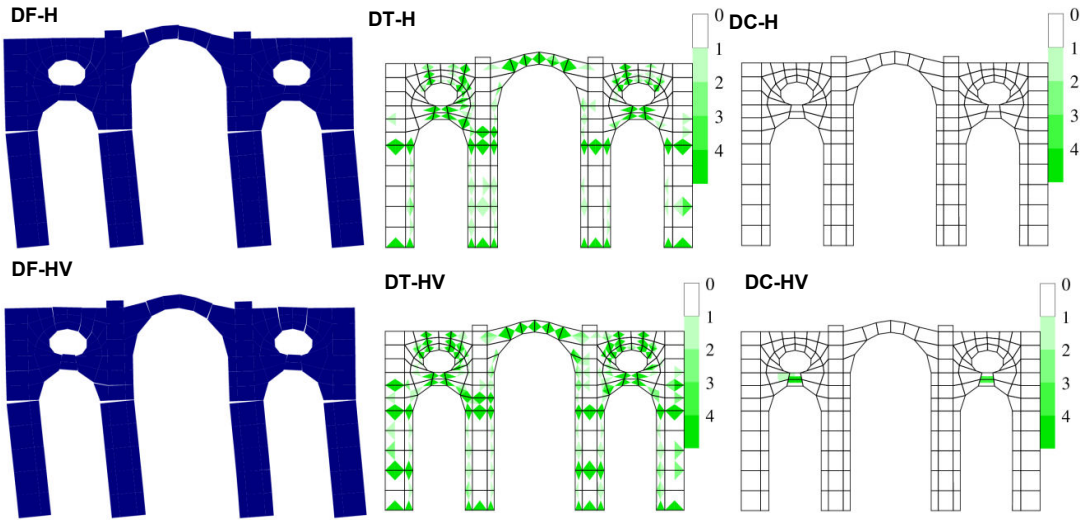

Figura 10 Terremoto de Tehuacán del 15 de junio de 1999 escalado a 975 años

Para el sismo indicado en la figura 9 no se presenta daño en compresión, y nuevamente se tienen daños por tensión en las naves; se observa en todos los casos daños por tensión de manera horizontal en la parte superior de las pilas justamente en el arranque de los arcos, el cual aparece debido al cambio de rigidez realizado en el modelo numérico, ya que la sección equivalente empleada cambia de una sección cruciforme en el pilar (ver figura 6) a un elemento plano bidimensional, por lo que rigurosamente no podría considerarse como un daño físico que pudiera ocurrir en la realidad. Los daños por cortante no aparecen para sismo horizontal, y se concentran mayormente sobre la nave lateral derecha con un grado

de daño igual a 4 (recurrencia de 975 años), y de manera más reducida (daño 2) sobre pilares principales y riñones del arco de la bóveda central (daño 1) cuando actúa la componente vertical.

En la figura 10 correspondiente al terremoto de Tehuacán, Puebla de 1999, no se presenta daño por compresión para la recurrencia de 975 años, y nuevamente hay daño extensivo por tensión sobre las naves y grados de daño por corte que alcanzan valores de 3 y 4, cuando actúa simultáneamente la acción sísmica vertical sobre las naves laterales. Las histéresis calculadas (ver figura 11) muestran para la componente horizontal del sismo lazos esbeltos estables por tratarse de mampostería simple, con una pequeña reducción de resistencia, situación que cambia ligeramente al involucrar la acción vertical, donde la energía disipada aumenta y aparecen degradaciones menores de rigidez adicionalmente a las de resistencia.

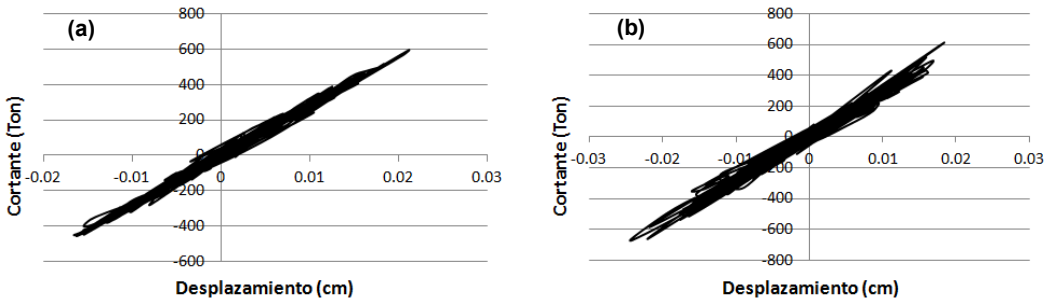

Figura 11 Histéresis para el macroelemento pórtico transepto ante el terremoto de Tehuacán del 15 de junio de 1999 escalado a 975 años. Componente horizontal (a) y componentes horizontal más vertical (b)

Macroelementos Pórtico Longitudinal

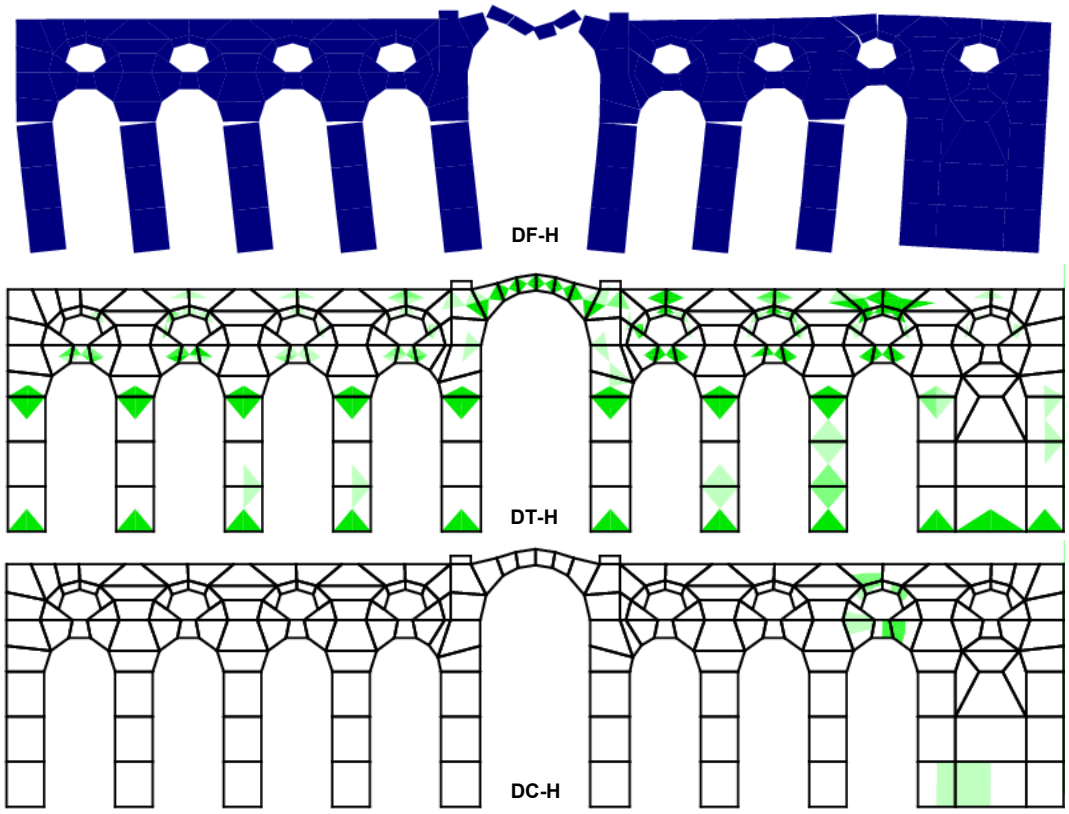

Figura 12 Terremoto de Tehuacán del 15 de junio de 1999 escalado a 475 años. Componente horizontal

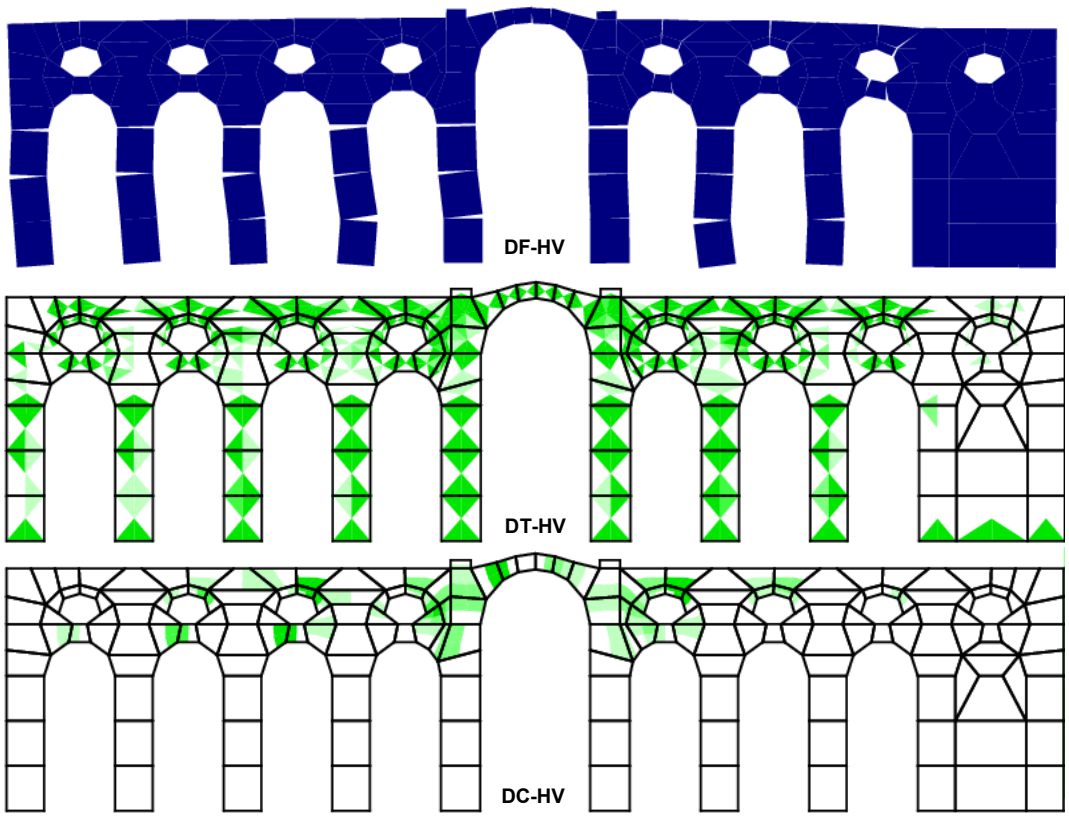

Figura 13 Terremoto de Tehuacán del 15 de junio de 1999 escalado a 475 años. Componente horizontal más vertical

El macroelemento longitudinal (ver figuras 12 y 13) es el único que falla por compresión ante el sismo de Tehuacán escalado a la recurrencia de 975 años y las dos componentes simultáneas del movimiento sísmico, por lo que en la figura 13 se muestra que ante este sismo escalado a 475 años, la componente vertical tiende en este caso particular a estabilizar el macroelemento en el transepto, zona sobre la cual gravita el cimborrio que tiene un peso total como se mencionó previamente de 176 toneladas, y cuya acción se introdujo como una carga adicional sobre dicha región. Para la componente horizontal únicamente se presentan daños por tensión importantes sobre la bóveda del crucero, concentrando daños por corte de ligeros a moderados en la zona del presbiterio debido al cambio de rigidez producido por el muro extremo paralelo al formero. Cuando aparece ahora la acción sísmica vertical el daño por tensión aumenta tanto en grado como extensión, y ahora los esfuerzos cortantes se concentran sobre los riñones de la bóveda del transepto, así como cerca de las claves y en óculos de buena parte del muro claristorio (ver figura 13).

Energía disipada

Como un indicador adicional de los grados de daño, se presentan en las tablas 3 a 5 los valores de energía promedio disipada histeréticamente para cada uno de los macroelementos, tanto para la componente horizontal (EH) como para la horizontal más vertical simultáneas (EHV).

CONCLUSIONES

La presente investigación se puede considerar como un primer aporte hacia el mejor entendimiento del comportamiento sísmico de edificaciones históricas de grandes dimensiones dentro de territorio mexicano, cuando se encuentran sometidas a la acción de movimientos fuertes del terreno de tipo horizontal y vertical simultáneos.

En la dirección de transversal del edificio, las zonas que experimentan mayores daños de tensión y cortante son las naves laterales, situación que se está tomando en cuenta en investigaciones posteriores para corregir los análisis actuales involucrando el daño, el cual se intentará localizarlo en estas zonas empleando técnicas no destructivas indirectas. Los macroelementos de los pórticos tipo experimentan principalmente daños por tensión, a diferencia de los dos existentes en la zona del transepto, que sufren mayores daños por cortante debido a su mayor rigidez (mayor altura) especialmente sobre las naves laterales, lo cual habla de que estos últimos presentan una menor vulnerabilidad con respecto a los primeros.

En la dirección de los macroelementos de los pórticos longitudinales, los mayores daños se concentran para todos los casos estudiados en la zona del transepto. En el caso presentado en la figura 13 el peso del cimborrio para el instante de análisis mostrado tiende a estabilizar a la bóveda del crucero, situación que se invierte para otros sismos e instantes de tiempo del análisis, lo cual solo pone en evidencia que dicha masa concentrada genera un grave efecto de inestabilidad que ante componentes de sismo verticales importantes, convierte a esta dirección del edificio en la más vulnerable de toda la estructura.

Tabla 3 Promedio de energía histerética en Macroelementos Pórtico Tipo

Sismo	Recurrencia (años)	EH (kJ)	EHV (kJ)	EHV/EH
Acapulco 02/09/1996	475	1.90	14.60	7.68
	975	2.53	15.52	6.13
Acapulco 10/12/1994	475	7.51	42.12	5.61
	975	10.81	52.65	4.87
Acapulco 31/03/1993	475	8.81	57.41	6.52
	975	12.67	66.40	5.24
Manzanillo 10/10/1995	475	6.45	16.50	2.56
	975	9.03	24.49	2.71
Puebla 15/06/1999	475	20.15	44.58	2.21
	975	27.90	63.52	2.28

Tabla 4 Promedio de energía histerética en Macroelementos Pórtico Transepto

Sismo	Recurrencia (años)	EH (kJ)	EHV (kJ)	EHV/EH
Acapulco 02/09/1996	475	0.58	13.70	23.62
	975	0.89	22.63	25.43
Acapulco 10/12/1994	475	7.86	45.25	5.76
	975	9.64	71.64	7.43
Acapulco 31/03/1993	475	8.84	72.87	8.24
	975	14.27	103.37	7.24
Manzanillo 10/10/1995	475	8.81	18.54	2.10
	975	11.74	31.15	2.65
Puebla 15/06/1999	475	25.09	52.13	2.08
	975	32.16	68.53	2.13

Tabla 5 Promedio de energía histerética en Macroelementos Longitudinales

Sismo	Recurrencia (años)	EH (kJ)	EHV (kJ)	EHV/EH
Acapulco 02/09/1996	475	2.61	28.6	10.96
	975	3.99	51.1	12.81
Acapulco 10/12/1994	475	32.12	119.49	3.72
	975	39.50	152.75	3.87
Acapulco 31/03/1993	475	31.1	191.32	6.15
	975	43.9	484.65	11.04
Manzanillo 10/10/1995	475	22.33	55.55	2.49
	975	35.65	99.29	2.79
Puebla 15/06/1999	475	84.74	251.44	2.97
	975	100.33	198.40	1.98

En términos de energía histerética disipada, en todos los casos y macroelementos ésta se ve incrementada cuando actúa la componente vertical sísmica; en los macroelementos pórtico tipo los rangos globales observados para este incremento van de 2.21 a 7.68 veces la energía disipada ante acción sísmica horizontal solamente, en los pórticos transepto de 2.08 a 25.43 y en los pórticos longitudinales de 1.98 a 12.81 veces, considerando las dos recurrencias de 475 y 975 años (ver tablas 3 a 5).

En resumen se puede concluir que el daño se incrementa significativamente al considerar actuando simultáneamente la componente vertical del sismo, situación que no se es posible identificarla en los estudios de vulnerabilidad sísmica que solo consideran la componente horizontal (Martínez *et al*., 2011). Lo anterior habrá que verificarlo en otras edificaciones que tengan otros tamaños y configuraciones (una sola nave, cinco naves, etc.), ya que de verificarse, se estaría hablando de que existe una gran vulnerabilidad de estas estructuras ante sismos de campo cercano, en los cuales las componentes verticales de aceleración suelen ser significativas.

REFERENCIAS

Casolo S. y Peña F. (2007), "**Rigid element model for in-plane dynamics of masonry walls considering hysteretic behavior and damage**", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol 36, pp. 1029-1048.

Doglioni F., Moretti A. y Petrini V. (1994), "**Churches and earthquakes**", LINT, Trieste (en italiano).

Gaytán R., Martínez G., Rojas R., Roca P., Viviescas A. (2010), "**Vulnerabilidad sísmica para el conjunto torres-fachada de la catedral de Morelia**", XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León Guanajuato.

ICOMOS, International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage, (2005), **"Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage"**, P.33. http:// www.international.icomos.org/.

Martínez G., Rojas R., Gaytan R. (2009), **"Caracterización Dinámica de las Torres de la Catedral de Morelia**", XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Puebla.

Martínez G., Rojas R., Gaytan R., Infante H. (2011), **"Fragilidad sísmica para las naves de la Catedral de Morelia**", XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Aguascalientes.

Peña F. (2010) **"Programa RIGID v.4.0.1"**, Manual del usuario, Instituto de Ingeniería, UNAM.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el apoyo brindado para la realización de la presente investigación.